

УДК 523.3

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ДЕТАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЛИПСОВ ПОСАДКИ ЛУНА-25

© 2022 г. С. С. Красильников^{а, *}, А. С. Красильников^а, М. А. Иванов^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: krasilnikovruss@gmail.com

Поступила в редакцию 20.07.2021 г.

После доработки 20.10.2021 г.

Принята к публикации 26.10.2021 г.

В работе проведен комплексный анализ инженерных и научных требований внутри основных эллипсов посадки экспедиции Луна-25. Для детализации эллипсов посадки были рассмотрены данные по условиям видимости Земли, освещению, критическим уклонам и кратерированности, в сочетании с геологическим строением и наличием водородсодержащих компонентов в грунте. Внутри эллипсов были выделены области с высокими, средними и низкими инженерными ограничениями на посадку и работу спускаемого аппарата. Оценены возможные источники вещества, накопившиеся в разных местах эллипсов посадки. Эти данные важны для интерпретации результатов анализа грунта в месте посадки спускаемого аппарата.

Ключевые слова: Луна, Луна-Глоб, Луна-25, места посадки

DOI: 10.31857/S0320930X22020050

ВВЕДЕНИЕ

Размер выбранных ранее основных эллипсов посадки 1 (68.773° ю.ш., 21.21° в.д.), 4 (68.648° ю.ш., 11.553° в.д.) и 6 (69.545° ю.ш., 43.544° в.д.) экспедиции Луна-25 составляет 15 × 30 км (Дьячкова и др., 2017). Внутреннее строение эллипсов неоднородно, как с геологической, так и с инженерной точек зрения (Ivanov и др., 2018) и следовательно, в пределах эллипсов есть более и менее безопасные места для посадки с потенциальной возможностью опробования реголита разных геологических комплексов.

Место посадки должно иметь подробное геологическое описание, которое позволило бы реконструировать историю формирования опробуемых геологических комплексов и определить источники их вещества. Это знание играет решающую роль при интерпретации результатов анализов, которые будет проводить на поверхности спускаемый аппарат. Целью данной работы, является общая инженерно-геологическая детализация выбранных ранее эллипсов, с определением научного потенциала геолого-геоморфологических подразделений и поиск возможных источников вещества, накопившегося в потенциальных местах посадки.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы результаты предыдущих исследований (Ivanov и др., 2018; Красильников и др., 2018; 2021), а также новые данные для выбранных эллипсов, полученные с помощью приборов LEND (Sanin и др., 2017) и Diviner (Paige и др., 2010), установленных на орбитальном аппарате LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Для инженерно-геологической детализации эллипсов была составлена подробная геологическая карта на сектор посадки (65°–75° ю.ш. и 0°–52° в.д.) в масштабе 1 : 300000 и карты в масштабе 1 : 100000 на посадочные эллипсы экспедиции Луна-25. Геологический анализ района посадки базировался на мозаиках снимков широкоугольной (WAC, Wide Angle Camera) и узкоугольной (NAC, Narrow Angle Camera) камер аппарата LRO, имеющих пространственное разрешение 100 и 0.5–1 м/пкс соответственно (Robinson и др., 2010), а также на цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 60 м/пикс, построенной по данным высотомера LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter; Smith и др., 2010). Для эллипсов были построены геологические разрезы, позволяющие оценить мощность выбросов кратеров, перекрывающих регион исследования. Снимки камеры NAC использовались также для определения мощности выбросов малых кратеров (менее 1 км в диаметре), расчета

плотности малых кратеров и каменности поверхности.

Геологические разрезы через эллипсы посадки построены с использованием данных лазерной альтиметрии с LOLA, модельной мощности выбросов и геологических карт, составленных в данном исследовании на основе работ (Ivanov и др., 2018) и (Красильников и др., 2021). Учитывались данные морфологического строения поверхности и характер распределения выброшенного материала. Для лучшей визуализации разрезов было выбрано соотношение горизонтального и вертикального масштабов 1 : 5. Мощность выбросов рассчитывалась для всех кратеров/бассейнов (ударные структуры диаметром более 300 км), влияющих на геологическое строение эллипсов посадки. Расчет мощности проводился с использованием модели Housen и др. (1983) для крупных кратеров диаметром более 45 км и модели Sharp-ton (2014) для кратеров меньшего размера. В модели Housen и др. (1983) радиальное уменьшение мощности выбросов описывается формулой:

$$T = 0.0078 \times R(r/R)^{-2.61},$$

а в модели Sharp-ton (2014):

$$T = 3.95(\pm 1.19) R^{0.399} (r/R)^{-3}.$$

Применительно к ударным бассейнам донектарианского возраста использовалась модель Fassett и др. (2011), которая описывает изменение радиальной мощности формулой:

$$T = 2900(\pm 300) R \times (r/R)^{-2.8(\pm 0.5)},$$

для всех формул R — это радиус кратера/бассейна, а r — расстояние от центра кратера.

Мощность выбросов рассчитывалась по радиусу от борта кратера/бассейна с шагом в 5 км. При построении разреза также учитывались отложения малых кратеров, которые выбрасывают и перемещают материал из-под перекрывающих слоев в местном масштабе (сотни метров—первые километры).

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Освещенность поверхности и прямая видимость с Земли являются одними из важных инженерных требований к месту посадки спускаемого аппарата. Освещенность аппарата позволит вырабатывать достаточно энергии для его функционирования на поверхности, а прямая видимость с Земли позволит установить стабильные сеансы радиосвязи для передачи данных. Более детально эти требования рассмотрены в работе (Дьячкова и др., 2017). В нашей статье использованы усредненные значения освещенности поверхности Солнцем и видимости с Земли за год (Mazarico и др., 2011), полученные по данным LOLA. К об-

ластям с высокими ограничениями отнесены пиксели со значением освещенности $\leq 40\%$ на единицу времени, области со средним ограничением соответствует освещенность 40–45%, при освещенности $> 45\%$ территория относится к области с низким ограничением. Аналогичная классификация применена к данным прямой видимости с Земли: $\leq 95\%$ — высокие ограничения, 95–99% — средние, 100% — низкие.

Для определения уклонов поверхности были использованы данные LOLA с разрешением 60 м (рис. 1) и метод теней, который позволяет получить оценку распространенности уклонов на базе, сравнимой с горизонтальными размерами спускаемого аппарата — 3.5 м (Абдрахимов и др., 2015; Красильников и др., 2018). Поверхности с уклоном $< 7^\circ$ (на максимальной базе 60 м) получили низкие ограничения, с уклонами 7° – 10° — средние, $> 10^\circ$ — высокие.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СЕКТОРА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реконструкции геологической истории в секторе посадки экспедиции Луна-25 было проведено его геологическое картирование в масштабе 1 : 300 000, результаты которого сравнивались с более ранними картами: с глобальной геологической картой в масштабе 1 : 5 000 000 (Wilhelms, 1972) и с геологической картой сектора посадки в масштабе 1 : 500 000 (Ivanov и др., 2018). Составленная нами геологическая карта сектора посадки охватывает территорию между 65° – 75° ю.ш. и 0° – 52° в.д. и представляет фрагмент региональной геологической карты на южный полюс Луны, которая готовится к публикации.

Доминирующим фактором обновления поверхности Луны является ударное кратерообразование. Главный эпизод такого обновления в южной полярной области связан с формированием бассейна Южный Полюс — Эйткен (SPA) более 4 млрд лет назад (Hiesinger и др., 2012). На покрове выбросов бассейна сформировались кратеры Boguslawsky, Boussingault, Manzinus и Simpelius донектарианского возраста (pNc), нектарианский (Nc) кратер Boussingault A и кратеры имбрийского возраста Moretus (Ic1) и Schomberger (Ic2). Основная часть исследуемого региона (рис. 2) перекрыта выбросами кратера Moretus (нижнеимбрийский возраст, 3.76 ± 0.03 млрд лет) и Schomberger (верхнеимбрийский возраст, 3.66 ± 0.04 млрд лет).

Стратиграфический возраст на региональной карте (рис. 2) и карте эллипсов (рис. 3–5) показан заглавными буквами и соответствует классификации Wilhelms (1972). На карте отмечены отложения донектарианского (pN), нектарианского (N), имбрийского и эратосфенского (E) возрастов. Имбрийский возраст был разделен на нижне-

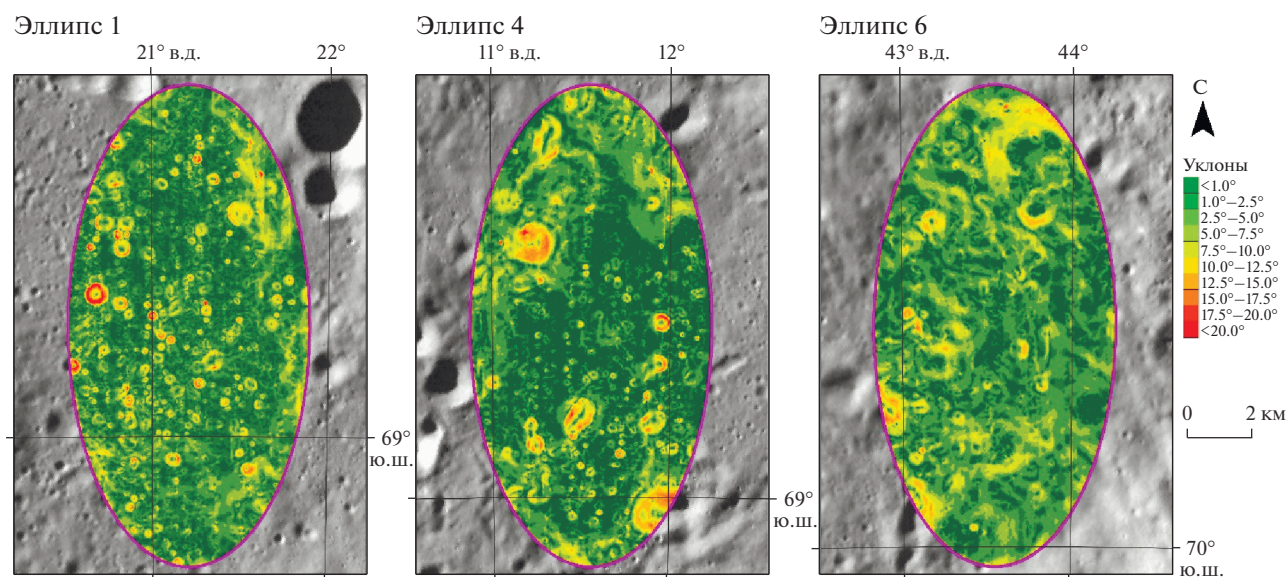


Рис. 1. Уклоны на базе 60 м по данным LOLA.

имбрийский (I1) и верхнеимбрийский (I2). Строчные индексы после возраста обозначают тип поверхности: “с” – внутренняя часть кратера; “se” – сплошной покров вторичных выбросов из кратера; “sc” – цепочки и поля вторичных кратеров. Основные геолого-геоморфологические подразделения: “гр” – неровная кратерированная поверхность неопределенного возраста; “sp” – плоская поверхность равнины неопределенного возраста; “cl” – оползни, преимущественно на склонах кратеров.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЭЛЛИПСОВ ПОСАДКИ И ПРИСУТСТВИЕ ВОДОРОДА В ГРУНТЕ

В нашей работе были детализированы геологические карты основных эллипсов посадки, опубликованные ранее (Ivanov и др., 2018). Индексы на карте эллипсов соответствуют описанной выше классификации. После стратиграфического возраста и типа поверхности на карте эллипсов указаны геолого-геоморфологические подразделения в соответствии с классификацией, предложенной в работе (Красильников и др., 2021). Для рассматриваемых эллипсов были выделены подразделения: “рс” – кратерированная пологоволнистая равнина со средней или высокой плотностью малых (до 1000 м в диаметре) кратеров; “гр” – холмисто-западинная равнина с низкой или средней плотностью кратеров; “sh” – пологосклонные холмы, с незначительным перепадом высот и низкой, либо средней плотностью кратеров; “с” – кратеры среднего размера (от одного до нескольких километров в диаметре), для которых можно выделить зону выбросов.

Оценка каменистости поверхности проводилась по сравнительному анализу данных радиометра Diviner и снимков LROC NAC. Bandfield и др. (2011) на основе данных Diviner построили мозаику снимков по каменистости поверхности. Наличие камней в пределах пикселя показано увеличением тепловой инерции более $1570 \text{ Дж м}^{-2} \text{ К}^{-1} \text{ с}^{-1/2}$ при 200 К. Анализ мозаики по основным эллипсам показал низкие значения каменистости с максимумом 0.02% (процент поверхности с камнями диаметром 0.5–1 м от площади одного пикселя съемки прибора Diviner, 237 м^2). Анализ снимков LROC NAC также не выявил существенных концентраций каменистого материала на поверхности (Ivanov и др., 2018). Увеличение количества камней характерно для свежих крутосклонных кратеров, с уклонами поверхности более 10° , что уже является лимитирующим инженерным фактором, поэтому отдельно в работе не рассматривается.

Основные эллипсы посадки экспедиции Луна-25 имеют более высокие значения водного эквивалента водорода по сравнению с остальными эллипсами. Средние значения WEN составляют: эллипс 1 (0.13 ± 0.01 мас. %, здесь и далее 1σ), эллипс 4 и 6 (0.12 ± 0.01 мас. %). Пространственное распределение WEN внутри эллипсов неравномерно, для эллипса 1 и 6 наблюдается постепенное увеличение значений к северу и северо-востоку, соответственно, а для эллипса 4 более высокие значения наблюдаются в его юго-западной части (рис. 3–5).

Эллипс 1 (68.77° ю.ш., 21.21° в.д.) расположен на межкратерной равнине, сформированной выбросами кратеров Manzinus и Simpelius A, пред-

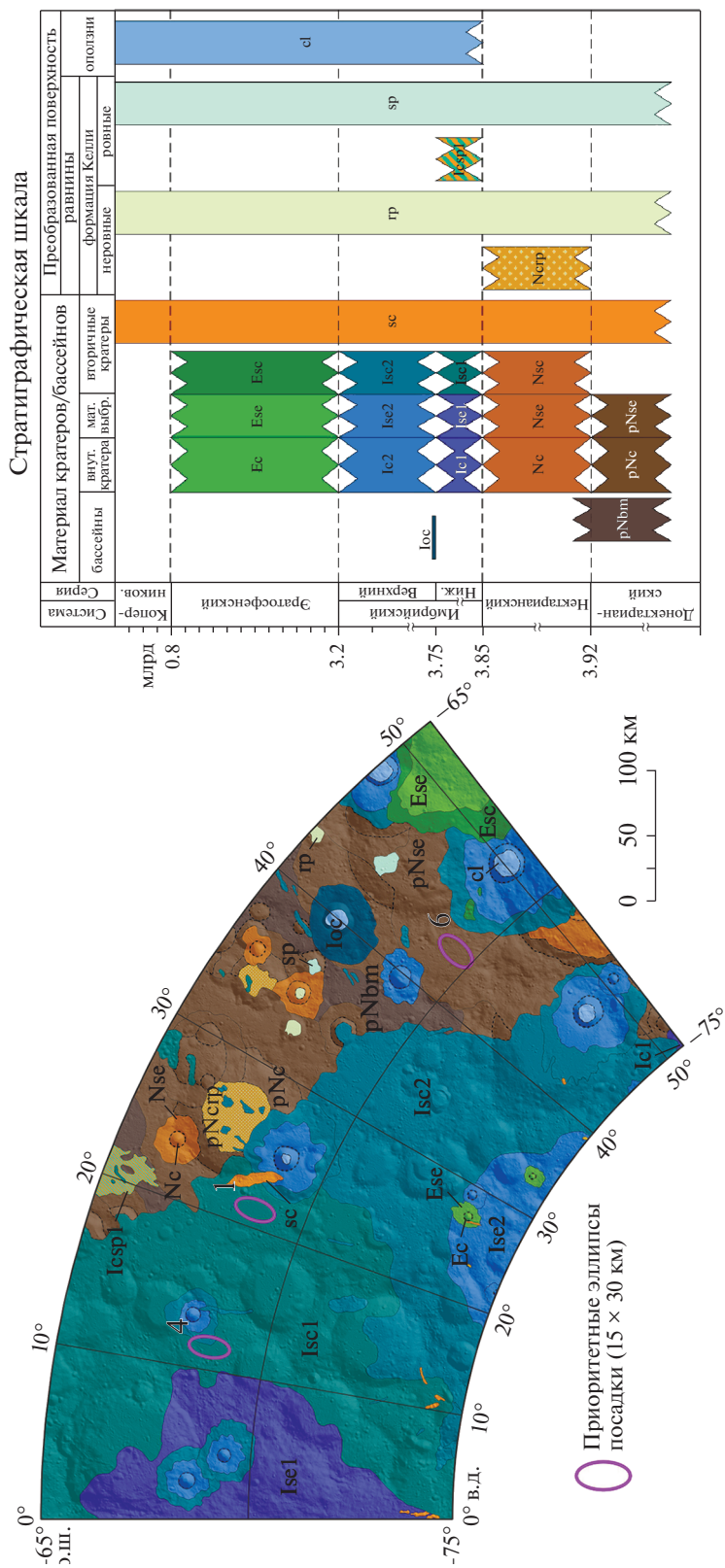


Рис. 2. Геолого-геоморфологическая карта в масштабе 1 : 300 000 на сектор посадки Луна-25.

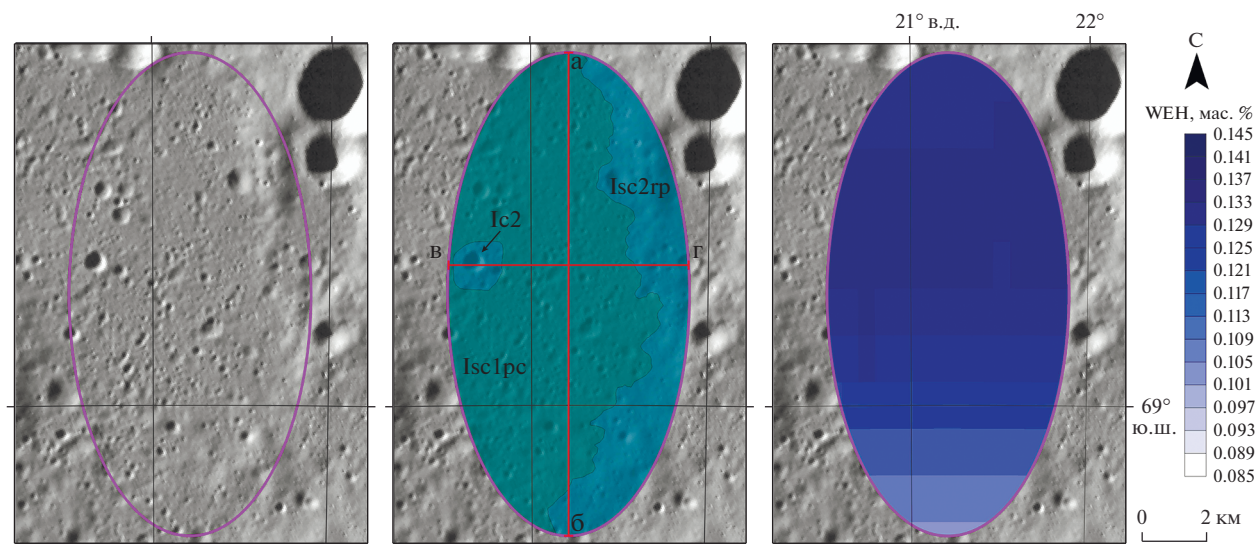


Рис. 3. Эллипс посадки 1. Слева направо показаны: морфология поверхности по снимкам WAC, геологическая карта эллипса (красные линии показывают положение геологических разрезов, см. рис. 6) и распределение значений водного эквивалента водорода (WEH).

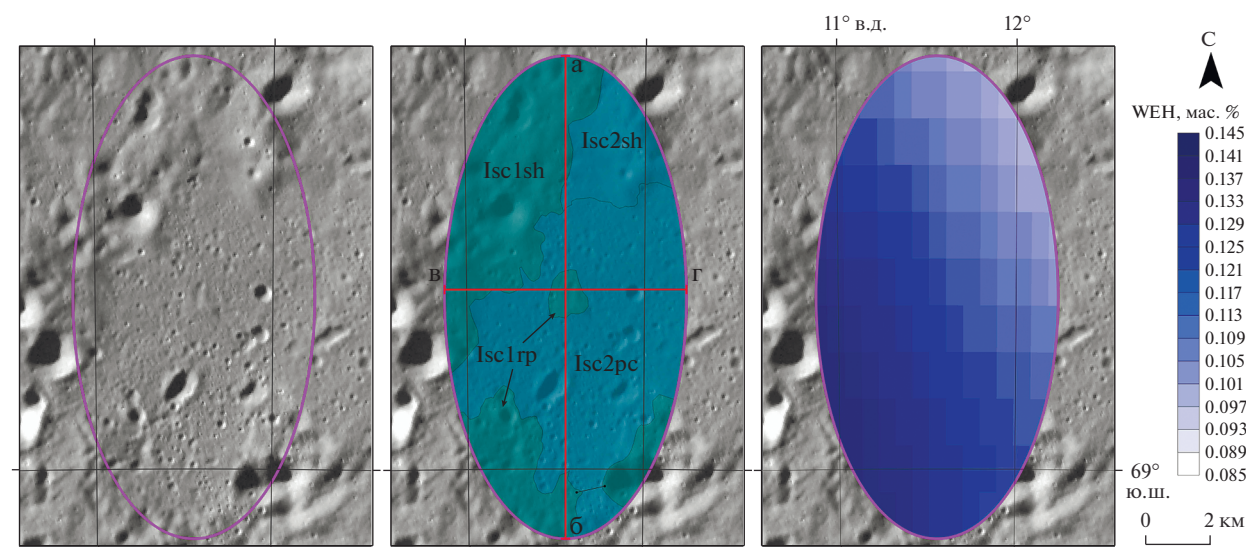


Рис. 4. Эллипс посадки 4. Слева направо показаны: морфология поверхности по снимкам WAC, геологическая карта эллипса (красные линии показывают положение геологических разрезов, см. рис. 6) и распределение значений водного эквивалента водорода (WEH).

положительно донектарианского (pNec) возраста (рис. 3). В пределах эллипса было выделено три основных геологических подразделения:

(1) Относительно плоская кратерированная равнина нижнеимбрийского возраста, занимающая 70.5% эллипса (Isc1pc). Равнина сформирована выбросами кратера Manzinus со следами вторичных кратеров из кратера Mutus B (pNec), впоследствии перекрытая выбросами кратера Moretus (Isc1). Абсолютный модельный возраст равнины, оцененный по частотно-размерному распределению

ударных кратеров, составляет $\sim 3.82 \pm 0.02$ млрд лет (Ivanov и др., 2018). Для данного подразделения наблюдается увеличение значений водного эквивалента водорода до 0.13–0.14 мас. % в центральной части эллипса, а среднее значение для всего подразделения составляет 0.13 ± 0.01 мас. %. Область с высокими ограничениями для посадки и работы спускаемого аппарата в данном подразделении составляет 4.5% от его общей площади, а со средними ограничениями – 6.3%.

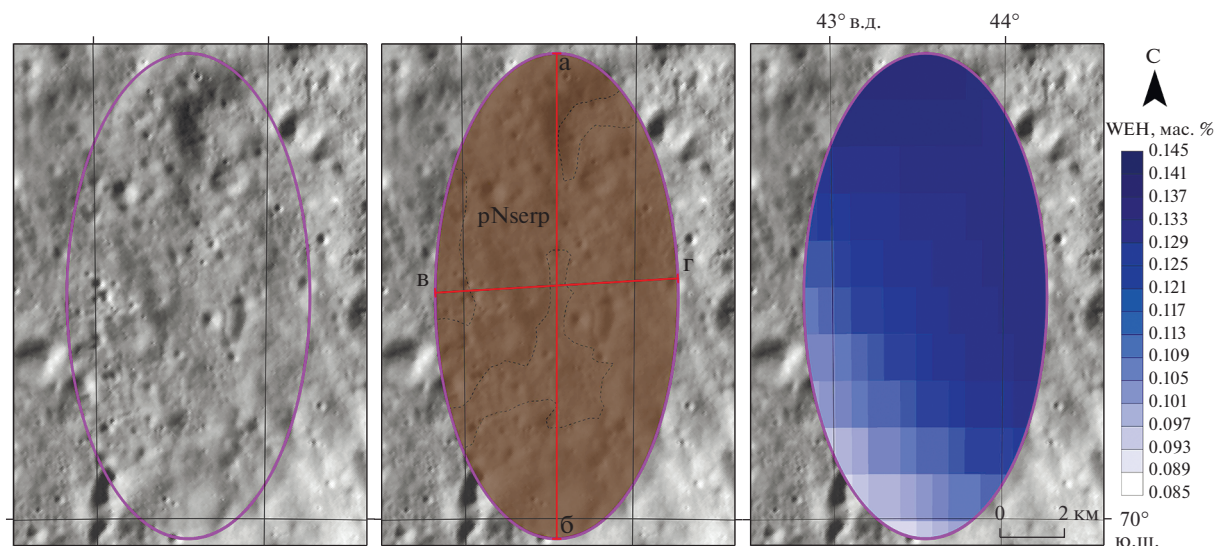


Рис. 5. Эллипс посадки 6. Слева направо показаны: морфология поверхности по снимкам WAC, геологическая карта эллипса (красные линии показывают положение геологических разрезов, см. рис. 6) и распределение значений водного эквивалента водорода (WEH).

(2) Слабонаклонная холмисто-западинная поверхность с вытянутыми грядами и понижениями верхнеимбрийского возраста (Isc2gr) расположена в восточной части эллипса и занимает 21.1% его поверхности. Равнина залегает на донектарианском основании и частично перекрыта верхнеимбрийскими отложениями кратера Manzinus E и кратера без названия на северо-западе от эллипса. Абсолютный модельный возраст равнины составляет $\sim 3.62 \pm 0.02$ млрд лет (Ivanov и др., 2018). Среднее значение WEH составляет 0.13 ± 0.01 мас. %. Область с высокими ограничениями в пределах этого подразделения составляет 4.6%, а с низкими — 11.3%.

(3) Кратер диаметром 1.4 км и его выбросы верхнеимбрийского возраста, расположены в западной части эллипса (Ic2) и занимают 8.4% его площади. Среднее значение WEH, связанное с кратером, составляет $0.14 \pm >0.01$ мас. %. Значительный процент территории с высокими (22.8%) и средними (7.2%) ограничениями в пределах данного подразделения связан с крутыми внутренними склонами кратера.

Продольный и поперечный геологические разрезы через эллипс 1 показывают его модельное внутреннее строение (рис. 6). Материал выбросов, накопившихся в данной области, залегает преимущественно субгоризонтально. В основании отложений располагаются выбросы бассейна SPA с расчетной мощностью около 870 м. Они перекрыты выбросами донектарианского кратера Manzinus, имеющими мощность от 180 до 85 м с С–В на Ю–З, соответственно. Выше залегают отложения кратера Simpelius A (pNec) с мощностью 35–18 м с Ю–З на С–В. На самой поверхности

располагаются нерасчлененные отложения малой мощности: из кратеров донектарианского возраста (Manzinus H с мощностью от 6 до 1 м с запада на восток, соответственно; Manzinus D, 22–5 м, Ю–В–С–З); нектарианского возраста (Manzinus C, 19–2 м, Ю–С) и верхнеимбрийского возраста (Manzinus E, 2–1 м, В–З). Поверхность осложнена небольшим количеством малых кратеров, отложения которых показаны индексом (uc), но поскольку разрез не всегда пересекает эти кратеры в центральной точке, зона их максимальной экскавации показана пунктирной линией (рис. 6). Глубина экскавации всех представленных крупных кратеров, кроме кратеров Manzinus H (pNec) и Manzinus E (UpImb), больше чехла отложений SPA, и их выбросы могут содержать в себе материал, более древний, чем в SPA.

Доля уклонов поверхности на базе первых метров, превышающих 10° и определенных по теням на снимках NAC, составляет 26% (Красильников и др., 2018), а по данным LOLA на базе 60 м — 4.15%. Резкое возрастание доли уклонов связано с влиянием малых (первые десятки метров в диаметре) кратеров с крутыми склонами ($>7^\circ$). Среднее расстояние между такими ближайшими кратерами в эллипсе 1 для подразделения Isc2gr составляет $\sim 23.3 \pm 13.3$ м, а для подразделения Isc1pc 14.2 ± 7.7 м (Ivanov и др., 2018).

Эллипс 4 (68.65° ю.ш., 11.55° в.д.) имеет наиболее сложное геолого-геоморфологическое строение (рис. 4). Эллипс располагается на межкратерной равнине, сложенной выбросами из кратеров донектарианского возраста Curtius, Simpelius E и, предположительно, из кратеров Pentland A и Simpelius A донектарианского или нектарианского

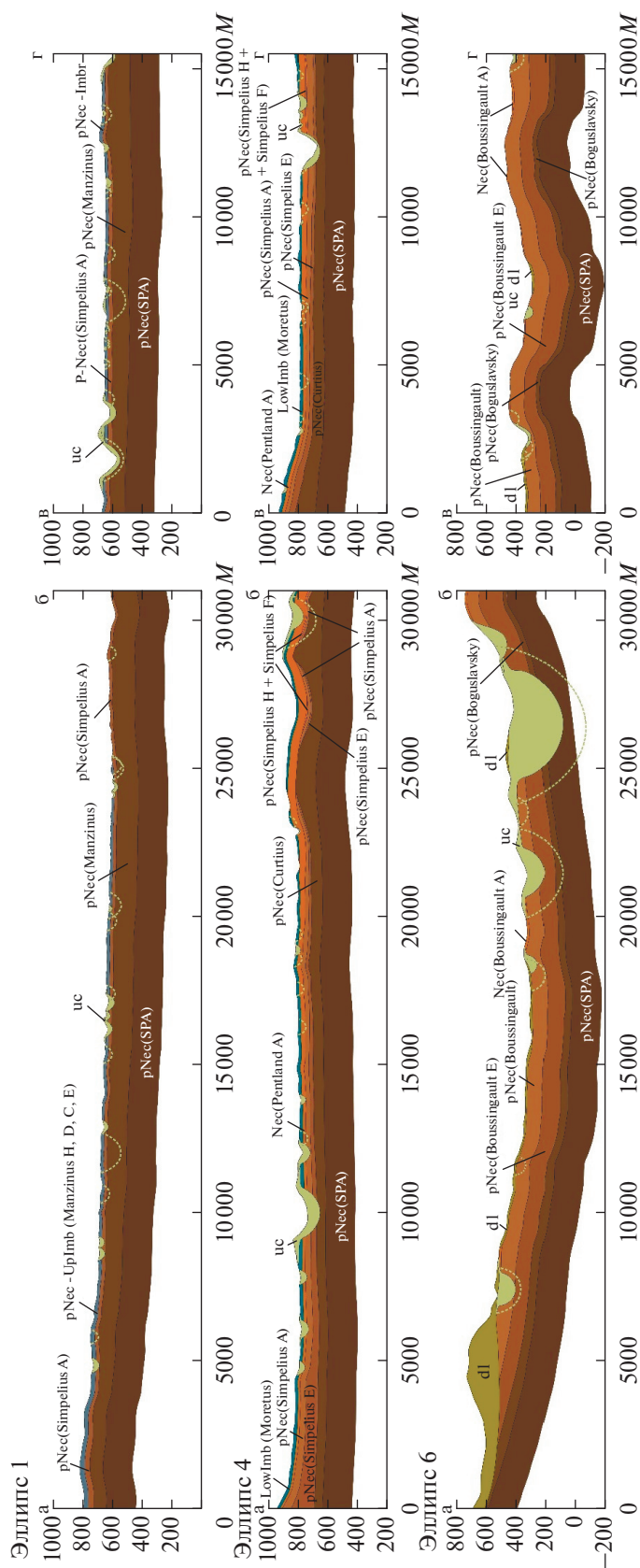


Рис. 6. Геологические разрезы через эллипсы посадки 1, 4 и 6. Показана мощность отложений наиболее крупных кратеров/бассейнов. Светло-зеленым цветом показано перераспределение отложений в результате образования малых кратеров (uc), а также зона их возможного влияния (пунктирная линия). В пределах эллипса 6 показан оползень (dl). Положение разрезов показано на рис. 3–5.

возраста. Впоследствии поверхность была перекрыта выбросами кратера Moretus нижнеимбрийского возраста. Большая часть эллипса перекрыта выбросами из кратера Pentland E верхнеимбрийского возраста, расположенного на С-В за пределами эллипса.

В пределах эллипса 4 отмечены четыре геолого-геоморфологические подразделения:

(1) Нижнеимбрийская слабонаклонная поверхность с холмами и вытянутыми понижениями (Isc1sh, 27.7% поверхности эллипса) с незначительной концентрацией малых кратеров расположена на северо-западе эллипса. Среднее значение WEN для данного подразделения составляет 0.12 ± 0.01 мас. %. Площадь поверхности данного подразделения с высокими ограничениями составляет 10.2%, а со средними ограничениями — 13.1%.

(2) Холмисто-западинная равнина нижнеимбрийского возраста характеризуется вытянутыми понижениями вторичных ударных кратеров (Isc1rp, 13.4% поверхности эллипса) и расположена в южной части эллипса. Абсолютный модельный возраст составляет $\sim 3.82 \pm 0.04$ млрд лет (Ivanov и др., 2018); для них наблюдается увеличение средних значений WEN до 0.13 ± 0.01 мас. %. Площадь поверхности данного подразделения с высокими ограничениями составляет 15.5%, а со средними ограничениями — 12.8%.

(3) Расположенная в северо-восточной части эллипса верхнеимбрийская поверхность с пологими холмами (Isc2sh) сформирована выбросами кратера Pentland E, занимает 10% территории и имеет низкую концентрацию малых кратеров. Абсолютный модельный возраст поверхности оценен как $\sim 3.6 \pm 0.03$ млрд лет (Ivanov и др., 2018). Значения WEN составляют 0.1 ± 0.01 мас. %. Площадь поверхности данного подразделения с высокими ограничениями составляет 2.2%, а со средними ограничениями — 12%.

(4) Верхнеимбрийская кратерированная слабоволнистая равнина с высокой концентрацией малых кратеров (Isc2pc, 48.9% территории). Предположительно, поверхность этого подразделения сформирована выбросами кратера Pentland E и имеет абсолютный модельный возраст $\sim 3.69 \pm 0.03$ млрд лет (Ivanov и др., 2018). Значения WEN для данного подразделения составляют 0.12 ± 0.01 мас. %. Равнина обладает небольшой долей территории с высокими (4.5%) и средними (4.9%) ограничениями.

Геологические разрезы через эллипс (рис. 6) показывают, что в его юго-восточной и центральной частях выбросы залегают субгоризонтально, а в северо-западной части происходит неравномерное утолщение выбросов из кратера Curtius, за счет чего на поверхности образуются холмы и впадины. В основании отложений располагается

материал выбросов SPA, имеющий мощность около 850 м. Выше по разрезу расположены отложения донектарианского кратера Curtius, мощность которых изменяется от 90 до 52 м в направлении С-В-Ю-З, при этом в С-З части эллипса мощность отложений может увеличиваться в два раза из-за неравномерности распределения выбрасываемого материала. Выше залегают отложения кратера Simpelius E (pNec), мощность которых уменьшается от 95 до 8 м в направлении Ю-С. Выше расположены отложения кратера Simpelius A (pNec) с мощностью 48–21 м (Ю-В-С-З). На еще более высоких горизонтах в восточной части эллипса могут встречаться отложения донектарианских кратеров Simpelius H и Simpelius F, не отмеченные на разрезе из-за их малой мощности. Кратер Pentland A (Nec) сформировал выбросы с мощностью 63–10 м (С-В-Ю-З). Поверхностный слой эллипса образован выбросами кратера Moretus нижнеимбрийского возраста с мощностью от 20 до 16 м в направлении Ю-З-С-В. Разрез осложнен малыми вытянутыми кратерами, предположительно вторичными, из кратера Moretus.

Доля уклонов $>10^\circ$ на базе нескольких метров по методу теней составляет 23% (Красильников и др., 2018), а по данным LOLA значение уклонов $>10^\circ$ составляет 6.34%. Как и в эллипсе 1, резкое увеличение крутых уклонов связано с большим количеством малых (первые десятки метров) крутосклонных кратеров.

Эллипс 6 (69.55° ю.ш., 43.54° в.д.) имеет относительно однородное геологическое и геоморфологическое строение (рис. 5). Эллипс расположен между тремя крупными донектарианскими кратерами: Boguslavsky (~ 95 км в диаметре), Boussingault (~ 128 км) и Boussingault E (~ 107 км). Поверхность эллипса сложена, в основном, выбросами из кратера Boussingault и, возможно, выбросами из соседних кратеров Boussingault A (Nec), Boussingault K и Boussingault F (Ic2). В холмисто-западинной равнине донектарианского возраста со средней концентрацией кратеров (pNserp) можно выделить подразделения второго порядка: холмисто-западинная слабонаклонная поверхность с вытянутыми формами рельефа (80.8% территории) и вытянутые понижения (19.2%) (Ivanov и др., 2018). Их абсолютный модельный возраст составляет $\sim 4.04 \pm 0.03$ млрд лет (Ivanov и др., 2018). В южной части эллипса располагается оползневое тело с отложениями донектарианского возраста (dl, рис. 6). Значения WEN постепенно увеличиваются при движении с юга на север и составляют около 0.14 мас. %. Доля территории с высокими ограничениями составляет 7.2%, со средними ограничениями — 12.1%.

В основании геологического разреза эллипса 6 (рис. 6) располагаются отложения SPA с мощностью около 1 км. Отложения SPA перекрыты вы-

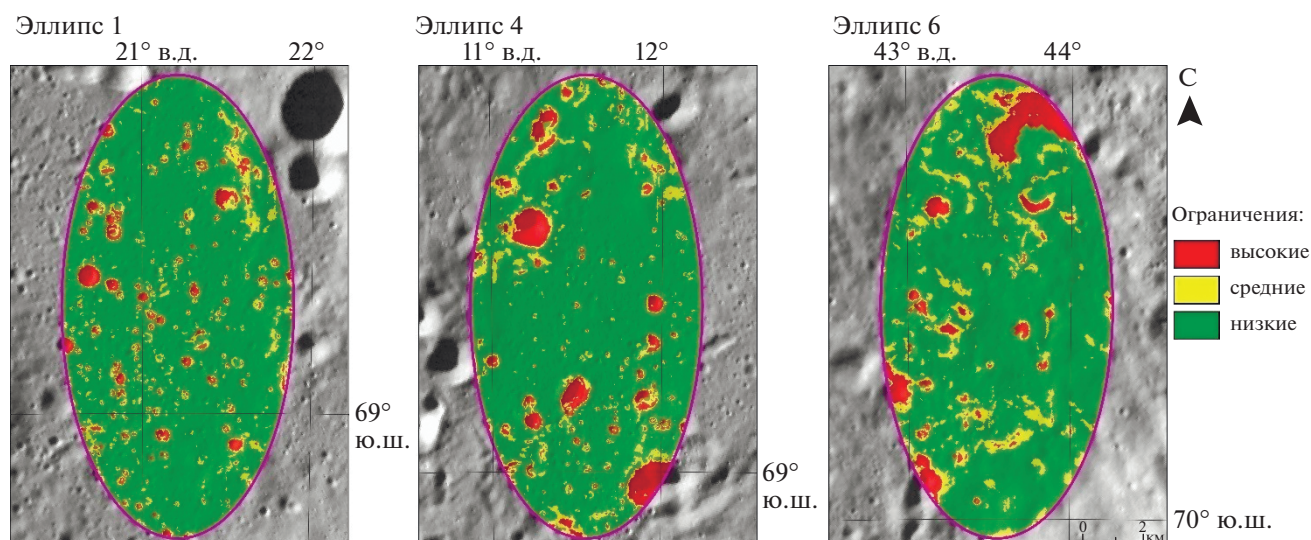


Рис. 7. Инженерно-технические ограничения для посадки и работы аппарата.

бросами из кратера Boguslavsky, мощность которых меняется по направлению Ю—С от 74 до 32 м. Выше расположены отложения кратера Boussingault E (pNec) с мощностью 152–95 м (С-В—Ю-3) и Boussingault (pNec) с мощностью 210–85 м (В-3). Отложения нектарианского кратера Boussingault А в пределах эллипса, вероятно, фрагментарны и имеют мощность 20–14 м. Мощность отложений самых молодых крупных кратеров Boussingault F (UpImb) и Boussingault K (UpImb) в пределах эллипса посадки суммарно не достигают 2 м и, по-видимому, не оказали значительного влияния на геологическое строение территории. Эти кратеры с большой долей вероятности пробили чехол отложений SPA и могут содержать в своих выбросах материал более древнего возраста. Поверхность эллипса осложнена более молодыми малыми кратерами имбрийского-коперниковского возраста и оползнем в южной части эллипса.

Доля уклонов поверхности, превышающих 10° на базе 3.5 м, по методу теней оценена как наименьшая среди исследуемых эллипсов и составляет 17% (Красильников и др., 2018). По данным LOLA площадь территории с долей уклонов >10° составляет 5.28% (Красильников и др., 2021). Средняя дистанция между затененными малыми кратерами для pNserp составляет $\sim 18.5 \pm 10$ м, для вытянутых понижений 18.4 ± 10.2 м (Ivanov и др., 2018).

ДЕТАЛИЗАЦИЯ МЕСТА ПОСАДКИ И ВЫВОДЫ

С учетом пространственного распределения уклонов на базе 60 м (рис. 1), освещенности поверхности Солнцем и видимости с Земли в пределах главных эллипсов посадки были выделены

области с высокими (красная область), средними (желтая) и низкими (зеленая) инженерными ограничениями на посадку и последующую работу спускаемого аппарата (рис. 7). Для областей с низкими ограничениями выполняются все инженерные требования для посадочного модуля: освещенность поверхности >45%, прямая видимость с Земли 100%, уклоны на поверхности <7°. Области со средними ограничениями характеризуются наличием одного или нескольких лимитирующих факторов со средними показателями: доля средней освещенности поверхности 40–45%, доля видимости с Земли 95–99%, уклоны на поверхности 7°–10°. Области с высокими ограничениями характеризуются уклонами поверхности выше критического (10°), низкой долей средней освещенности поверхности ($\leq 40\%$), низкой ($\leq 95\%$) долей видимости с Земли, либо некоторыми из этих параметров. Высокие значения уклонов поверхности в основном связаны с малыми кратерами, вытянутыми грядами и ложбинами, свидетельствующими о неравномерном распределении материалов выбросов близлежащих кратеров. Для эллипсов 1 и 4 малые кратеры, однако, могут представлять объекты высокого научного значения, так как они зачастую пробивают мало-мощный покров выбросов имбрийского возраста и могли вынести на поверхность образцы нижележащих слоев нектарианского и донектарианского возрастов.

В пределах эллипса 1 выделено три геолого-геоморфологических подразделения: (1) относительно плоская кратерированная равнина нижнеимбрийского возраста (Isc1pc, занимающая 70.5% территории), (2) слабонаклонная холмисто-западинная поверхность с вытянутыми грядами и понижениями верхнеимбрийского воз-

раста (Isc2gr, 21.1%) и (3) средний кратер с выбросами (Ic2, 8.4%). Наиболее перспективной с научной точки зрения может считаться северная часть первого подразделения (Isc1pc), где среднее значения WEN составляют $0.13 \pm >0.01$ мас. %. Плоская кратерированная равнина этого подразделения сложена выбросами из кратера Moretus нижнеимбрийского возраста ($\sim 3.82 \pm 0.02$ млрд лет) с мощностью около 10 м. Ниже по разрезу идут отложения кратеров донектарианского возраста: Manzinus D (диаметр ~ 30 км), Simpeliu A (~ 58 км) и кратера Manzinus (~ 94 км). Размеры этих кратеров позволяют считать, что глубина экскавации (обычно принимаемая равной 1/10 диаметра кратера) была достаточной для того, чтобы выбросить на поверхность материал из-под покрова выбросов SPA (модельная мощность 870 м) и, следовательно, предшествующего ударному событию SPA. Это вещество должно относиться к самым начальным стадиям формирования лунной коры и представляет собой объект крайне высокой научной ценности.

В пределах эллипса 4 отмечены четыре геолого-геоморфологических подразделения: (1) нижнеимбрийская слабонаклонная поверхность с холмами и вытянутыми понижениями (Isc1sh, 27.7% поверхности эллипса), (2) холмисто-западинная равнина нижнеимбрийского возраста характеризуется вытянутыми понижениями вторичных ударных кратеров (Isc1rp, 13.4%), (3) расположенная в северо-восточной части эллипса верхнеимбрийская поверхность с пологими холмами (Isc2sh, 10%), (4) верхнеимбрийская кратерированная слабоволнистая равнина с высокой концентрацией малых кратеров (Isc2pc, 48.9%). Перспективной с научной точки зрения является часть верхнеимбрийской ($\sim 3.69 \pm 0.03$ млрд лет) кратерированной равнины (Isc2pc) с высокой концентрацией малых кратеров в западной части эллипса (рис. 7). Значения WEN постепенно увеличиваются к Ю-3 эллипса и в данной области достигают 0.13 ± 0.01 мас. %. В данной области под маломощными (< 5 м) верхнеимбрийскими отложениями кратера Pentland E (диаметром ~ 11 км) располагаются нижнеимбрийские отложения кратера Moretus (~ 116 км), Pentland A (Nec, ~ 43 км), Simpeliu A (pNec, ~ 58 км), Simpeliu E (pNec, ~ 40 км) и Curtius (~ 95 км). Модельная мощность отложений SPA в этой области составляет ~ 850 м. Выбросы этих и малых кратеров, повсеместно встречающихся в пределах этой области, должны содержать вещество нектарианского и донектарианского возрастов, выброшенное из-под поверхностных отложений.

Эллипс 6 расположен на холмисто-западинной равнине донектарианского возраста со средней концентрацией кратеров (pNserp) и обладает однородным геологическим строением, однако вытянутые понижения с более высокими значе-

ниями уклонов могут представлять опасность при посадке. С научной точки зрения наиболее перспективной может считаться восточная часть эллипса (рис. 7), где значения WEN составляют в среднем $0.13 \pm >0.01$ мас. %. Поверхность в этой части эллипса представлена холмисто-западинной равниной донектарианского возраста ($\sim 4.04 \pm 0.03$ млрд лет, подразделение pNserp), сложенной выбросами кратера Boussingault (pNse, ~ 129 км) с модельной мощностью около 210 м. На поверхности возможно также фрагментарное присутствие отложений кратера Boussingault A (Nec, ~ 75 км) с мощностью до 20 м. Ниже по разрезу идут отложения Boussingault, Boussingault E (pNec, ~ 107 км) и кратера Boguslavsky (~ 95 км). Диаметры этих кратеров таковы, что глубина экскавации превышает модельную мощность выбросов SPA, и их выбросы могут содержать образцы более древних пород, предшествующих образованию бассейна SPA.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда № 21-17-00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдрахимов А.М., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П., Хэд Дж.У. Оценка вероятностей встречи уклонов на поверхности Луны по доле затененной поверхности на снимках LROC NAC // Астрон. вестн. 2015. Т. 49. № 5. С. 1–9.
(Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Kokhanov A.A., Karachevtseva I.P., Head J.W. Occurrence probability of slopes on the lunar surface: Estimate by the shaded area percentage in the LROC NAC images // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. № 5. P. 285–294.)
<https://doi.org/10.7868/S0320930X15050011>
- Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 3. С. 204–215.
(Dyachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. Selection of Luna-25 landing sites in the south polar region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 3. P. 185–195.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617030029>
- Красильников С.С., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Абдрахимов А.М., Коханов А.А. Оценка крутизны склонов в местах посадки КА Луна-Глоб по доле тени на снимках LROC NAC // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 2. С. 99–109.
(Krasilnikov S.S., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Kokhanov A.A. Steepness of slopes at the Luna-Glob landing sites: Estimating by the shaded area percentage in the LROC NAC images // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 2. P. 87–97.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094618010045>
- Красильников С.С., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Красильников А.С. Геолого-геоморфологическая характеристика приоритетных мест посадки миссии

- Луна-Глоб // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 2. С. 99–113. (Krasilnikov S.S., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Krasilnikov A.S. Geological and geomorphological characteristics of high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // Sol. Syst. Res. 2018. V. 55. № 2. P. 83–96.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X21010059>
- Bandfield J.L., Ghent R.R., Vasavada A.R., Paige D.A., Lawrence S.J., Robinson M.S. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data // J. Geophys. Res. E: Planets. 2011. V. 116. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2011JE003866>
- Fassett C.I., Head J.W., Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A. Thickness of proximal ejecta from the Orientale Basin from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Implications for multi-ring basin formation // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L17201. <https://doi.org/10.1029/2011GL048502>
- Housen K.R., Schmidt R.M., Holsapple K.A. Crater ejecta scaling laws: fundamental forms based on dimensional analysis // J. Geophys. Res. B3. 1983. V. 88. P. 2485–2499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02485>
- Hiesinger H., van der Bogert C.H., Pasckert J.H., Schmedemann N., Robinson M.S., Jolliff B., Petro N. New crater size-frequency distribution measurements of the South Pole Aitken basin // 43th LPSC Conf. 2012. Abs. 2863.
- Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S. Geological characterization of the three high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // Planet. and Space Sci. 2018. V. 162. P. 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.08.004>
- Mazarico E., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T., Torrence M.H. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography // Icarus. 2011. V. 211. P. 1066–1081. <https://doi.org/10.1016/J.ICARUS.2010.10.030>
- Paige D.A., Foote M.C., Greenhagen B.T., Schofield J.T., Calcutt S., Vasavada A.R., Preston D.J., Taylor F.W., Allen C.C., Snook K.J., Jakosky B.M., Murray B.C., Soderblom L.A., Jau B., Loring S., Bulharowski J., Bowles N.E., Thomas I.R., Sullivan M.T., Avis C., De Jong E.M., Hartford W., McCleese D.J. The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner lunar radiometer experiment // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 125–160. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9529-2>
- Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S.J., Thomas P.C., Denevi B.W., Denevi P.C., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M.A., Caplinger M.A., Ghaemi F.T., Schaffner J.A., Malin M.C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T.N., Eliason E.M., McEwen A.S., Turtle E., Jolliff B.L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 81–124. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9634-2>
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Starr R.D., Sagdeev R.Z., Tretyakov V.I., Vostrukhin A.A. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002>
- Sharpton V.L. Outcrops on lunar crater rims: Implications for rim construction mechanisms, ejecta volumes and excavation depths // J. Geophys. Res. E: Planets. 2014. V. 119. P. 154–168. <https://doi.org/10.1002/2013JE004523>
- Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Xiaoli S., Ronald S.Z., Zellar S., Coltharp C., Connelly J., Katz R.B., Kleyner I., Liiva P., Matuszeski A., Mazarico E.M., McGarry J.F., Novo-Gradac A.-M., Ott M.N., Peters C., Ramos-Izquierdo L.A., Ramsey L., Rowlands D.D., Schmidt S., Stanley V.S. III, Shaw G.B., Smith J.C., Swinski J.-P., Torrence M.H., Unger G., Yu A.W., Zagwodzki T.W. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 209–241. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9512-y>
- Wilhelms D.E. Geologic mapping of the second planet // US Geol. Surv. Interag. Report: Astrogeology. 1972. V. 55. P. 199–238.